干旱区研究
ARID ZONE RESEARCH

doi:10.13866/j.azr.2018.06.01

生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响①

赵 军[1]， 杨建霞[1]， 朱国锋[1,2]

（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院，冰冻圈科学国家重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 以人工干预的形式输水恢复退化的生态是目前缓解生态问题的一种有效方式。石羊河尾闾湖——青土湖是典型应用案例之一，生态输水对区域各种环境机制如何影响备受关注。本文利用青土湖 1987—2016 年 Landsat 影像反演植被覆盖度（FVC），首先探究 FVC 总体动态变化特征，其次分析其变化除受气候因素的影响外与生态输水之间的关系。研究显示：30 a 来青土湖周边区域平均植被覆盖度由 10% 左右增加到 20% 以上；2010 年前后植被覆盖度变化趋势明显不同。利用趋势分析对比 2010 年 9 月生态输水前后植被覆盖度的变化特征，结果表明：尽管气候变化是影响大范围植被覆盖度的主要因素，但在该研究中气候变化对青土湖周边植被覆盖度上升的影响较弱；植被覆盖度主要在靠近湖区区域显著增加，生态输水是其增加的主要影响因素。2010 年生态输水前年平均植被覆盖度变化趋势不明显，2010 年生态输水后呈显著上升趋势。

关键词： 生态输水；植被覆盖度；气候变化；青土湖

由上游占用下游生态用水所引起的水资源不合理配置，是干旱地区内陆河流域生态系统退化的主要原因[1]，对下游区域来说，保证一定质量和数量的生态用水能够弥补天然生态系统的不足、保护区域物种多样性和生态整合性[2]。而向生态退化区域实施输水工程，补偿地下水和改善水资源环境是河流生态系统恢复的基本行为和必然过程[3]，对促进区域环境改善具有积极作用[4]。以人工干预的形式输水恢复退化生态已经在塔里木河成功实施[5-6]，而且输水对该区域地下水位[7-8]、植被种类[9-10]、植物生理机制[11]以及区域生态系统产生了显著的影响，证明人工干预输水是区域退化生态恢复的一种有效方法[12-13]。

青土湖是石羊河的尾闾湖，地理位置 39°04′～39°09′N、103°36′～103°39′E，地处甘肃省民勤县东北方向巴丹吉林沙漠东南部、腾格里沙漠西部[14]（图 1），海拔 1 292～1 310 m，年平均气温 7.8 ℃，年降水量 110 mm 左右，降水主要集中在 7—9 月，占全年降水量的 73%[15-16]，但蒸发量远大于降水量，全年盛行西北风，属于典型的温带大陆性干旱气候[17]。它曾是石羊河流域最大的湖泊，水域面积超过 4×10^8 km^2，后因气候变化和人类不合理利用水资源等，湖泊面积开始萎缩，加之红崖山水库的修建，导致下游地下水位大幅度下降，于 1959 年彻底干涸[18-19]。2008 年《石羊河流域重点治理规划》实施以后，环境有所改善。自 2010 年 9 月红崖山水库有计划地向下游生态输水[20]，青土湖开始形成水面，周边生态环境明显好转。由于青土湖作为一个巨大的生态屏障位于巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠之间[21-22]，具有重要的生态意义。因此，该区域生态输水前后地下水位变化、植物物种、植物生理及各种生态环境因素如何变化问题备受国内外学者关注[23]。近年来，国内外学者的研究主要有以下几个方面：① 以石羊河为研究区的植被自我调节功能、植被覆盖变化特征、植被对地下水和气候响应等研究；② 以民勤绿洲为研究区的植被覆盖度空间变化特征等研究；③ 以青土湖为研究区研究输水对生态环境的影响、水面形成对区域典型植被分布的影响、地下水位变化等。可以看出，目前主要以整个石羊河流域及其石羊河下游作为研究区的研究较多，而以青土湖为研究区的研究较少，生态输水后虽对青土湖小区域内植物类型的转变、不同距离范围内地

① 收稿日期：2018－03－20； 修订日期：2018－06－14
基金项目：国家自然科学基金项目（41661084，41661005）；国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金（41421061）；冰冻圈科学国家重点实验室自主课题（SKLCS－ZZ－2017）
作者简介：赵军（1963－），男，教授，博士研究生导师，主要从事环境遥感与 GIS 应用研究．E-mail：zhaojun@nwnu.edu.cn

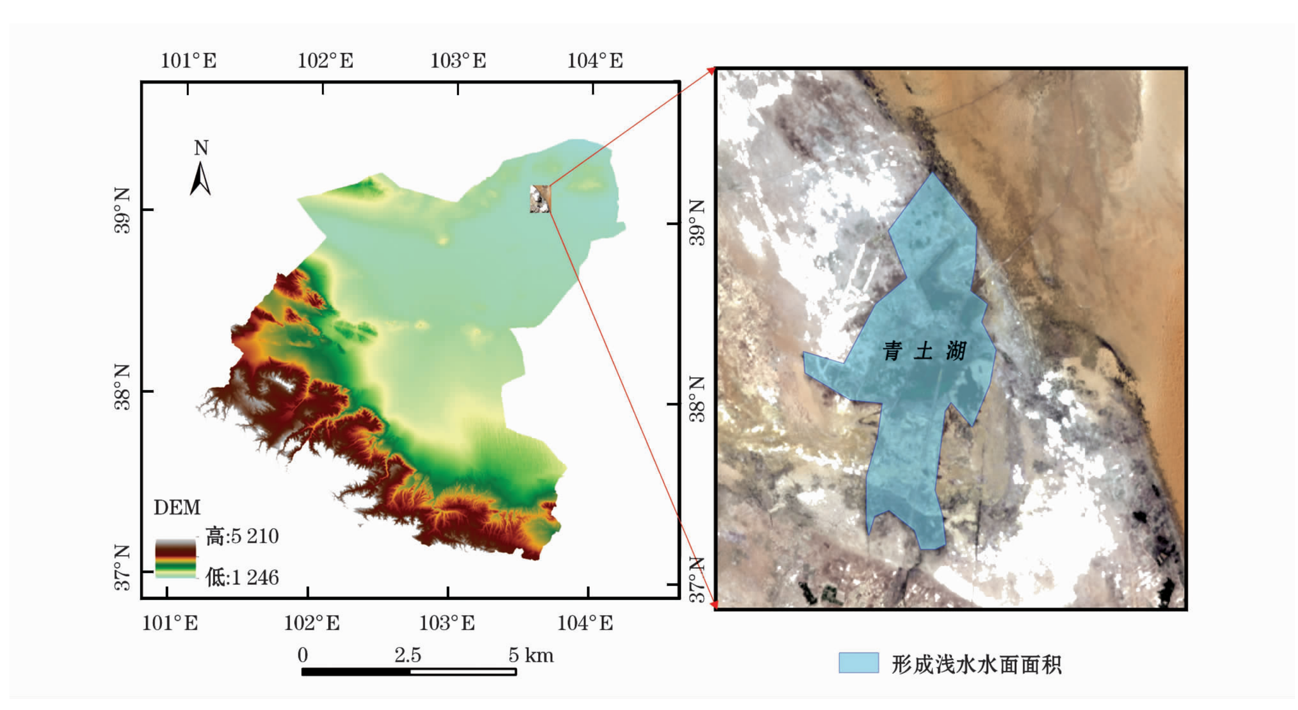


图 1　研究区位置示意图

Fig. 1　Geographical location of the study area

下水位变化做了相关研究,但时间序列短,区域范围较小,无法展示长时间序列青土湖周围植被覆盖度的变化趋势及其成因。

本文利用 1987—2016 年遥感影像数据反演青土湖周边地区植被覆盖度。在宏观方面,探究长时间序列青土湖周边较大区域内植被覆盖度变化、变化特点及其变化趋势等问题。系统分析 30 a 来青土湖周围植被覆盖度变化特征,对比 2010 年生态输水前的植被覆盖度变化和 2010 年生态输水后的变化,讨论除气候变化外,生态输水对植被覆盖度变化的影响,探究在考虑气候变化条件下植被覆盖度与生态输水之间的联系,既对青土湖 30 a 来植被覆盖度动态变化做了监测,也探讨了生态输水对青土湖周边区域的影响。对青土湖生态输水作出相应的评估,为生态环境治理和保护提供科学依据。

1　数据和方法

1.1　研究数据

使用多源遥感图像,包括 1987—2016 年逐年 6—9 月的 Landsat TM 和 OLI 影像,分辨率为 30 m,合成影像分辨率 15 m,时间分辨率 16 d;哨兵(Sential2A)影像数据,分辨率为 10 m;这两种数据来源于 USGS(https://glovis.usgs.gov/)。2014 年的高分一号(GF1)影像数据来源于高分中心。研究过程中对影像做了几何校正、大气校正及裁剪等预处理。Landsat 卫星的 TM/OLI 影像数据覆盖时间长,且有较高的分辨率,适用于长时间序列的研究。高分一号和哨兵 2A 影像分辨率较高,用于提取输水后形成的水面轮廓及面积统计。气象数据包括平均气温、降水量、平均相对湿度、平均风速、平均水汽压等,来源于中国气象数据共享网(http://data.cma.cn/);生态输水相关数据来自于武威市统计年鉴。

1.2　研究方法

1.2.1　植被覆盖度(FVC)反演　植被覆盖度(fractional vegetation cover,FVC)指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是评判干旱地区土地退化和荒漠化的一个重要因子[24]。FVC 是在归一化植被指数(NDVI)基础上改进,在一定程度上解决了 NDVI 对于覆盖度高的植被易于饱和、而对覆盖度低的植被难于区分的不足,能更好地反映区域地表植被动态变化状况[25-26]。在全球气候变化对生态系统的影响研究中,常作为反映区域地表植被群落生长态势的重要指数和评价区域生态系统健康程度的基础数据[27],也是指示区域生态系统环境变化的重要指标[28]。长时间序列的植被覆盖范围信息可以利用遥感影像获得,能够直观地反映植被覆盖度的变化[29]。

像元二分模型是最常用的计算植被覆盖度

(FVC)的模型,该模型是假设每个像元的 NDVI 值只由土壤和植被两部分构成,青土湖周边植被主要以芦苇为主,土壤主要为沙土,地类单一,能够取一定置信区间内 NDVI 的方法反演 FVC 。计算公式[30-31]如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:FVC 为植被覆盖度;NDVI 为逐年 6—9 月混合像元的平均归一化植被指数,即计算每年 6—9 月的 NDVI 取平均,代表该年的 NDVI 值;$NDVI_{soil}$ 取 0.5% 置信区间内的平均最小值,代表没有植被覆盖的纯土壤像元值;$NDVI_{veg}$ 取 99.5% 置信区间内的平均最大值,代表纯植被覆盖像元值[32]。利用置信区间取像元最大值和最小值的方法,排除了一些外界偶然因素对像元值大小的影响。

1.2.2　统计分析方法

(1) 相关性分析:利用相关性分析植被覆盖度和生态输水、气候变化的关系。通过计算温度与 FVC、降雨量与 FVC、形成水面面积与 FVC、入湖水量与 FVC 等的积差相关系数,来确定 FVC 与气候、生态输水等因素的相关性,以此来表示对各种影响因子变化的响应,并判断气温、降水量和输水中哪个因子与 FVC 有更强的相关性。

(2) 趋势分析:采用最小二乘法逐像元拟合年平均 FVC 的斜率,能够模拟每个栅格的变化趋势,综合反映区域植被的时空格局演变[33]。本文利用 1987—2016 年研究区 FVC 的整体变化趋势,判断 FVC 年际变化的显著性,斜率为负表示植被覆盖度下降,斜率为正则表示植被覆盖度上升[34]。根据 F 检验,以相关系数 P 值来表达其变化的显著与否[35],将变化趋势分为 5 个等级:显著下降(slope < 0, $P<0.01$),下降(slope < 0, $0.01<P<0.05$),无明显变化($P>0.05$),上升(slope > 0, $0.01<P<0.05$),显著上升(slope > 0, $P<0.01$)[36]。

(3) 多元回归及回归残差分析:通过对每个像元的植被覆盖度与气温、降水量、风速、水汽压、气压等相关气候因子指标做多元线性回归分析,得到 FVC 的预测值[36-38],该预测值作为仅受自然条件影响下的植被覆盖状况值,并通过预测的植被覆盖度与实际反演计算的植被覆盖度比较,来说明人为因素对植被覆盖度的影响状况[39]。

2　结果分析

2.1　1987—2016 年植被覆盖度总体变化特征

2.1.1　时间变化特征　从青土湖及其周边区域 1987—2016 年植被覆盖度的时间变化曲线(图 2)可以看出,30 a 来植被覆盖度总体有所增加,但 1987—2010 年期间青土湖及周边的植被覆盖度变化不明显,年平均植被覆盖度在 10% 左右,最大值也仅有 13%,最小 8%,最大值与最小值相差 5%,植被覆盖度总体上比较稳定;2010 年后植被覆盖度变化明显。反映出时间上植被覆盖度呈较快上升趋势,这个变化对于青土湖及其周边环境来说是有益的。

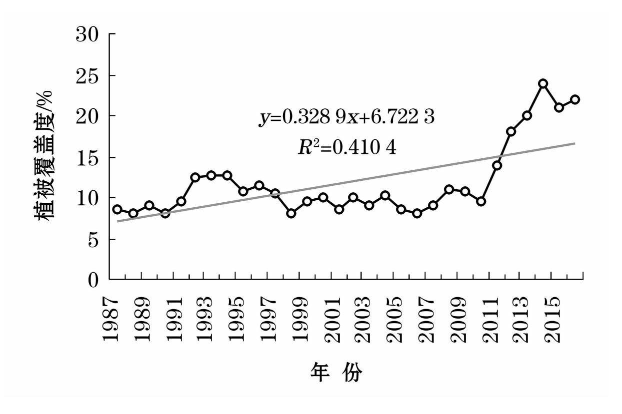


图 2　1987—2016 年植被覆盖度时间变化特征

Fig. 2　Temporal variation of vegetation coverage from 1987 to 2016

2.1.2　空间变化特征　图 3 表现了 1987—2016 年 FVC 的空间分布动态变化,从图中可以看出,2010 年之前青土湖周边植被覆盖度很低,年平均植被覆盖度处于 10% 左右,2011 年湖区植被覆盖度仍较低,但 2014 年湖区植被覆盖度较高,最大覆盖度已到 80% 左右,高植被覆盖度区域范围也有所增加。

依据干旱区植被覆盖度分级标准将植被覆盖度分为低覆盖(<10%)、较低覆盖(10% ~30%)、中度覆盖(30% ~45%)、较高覆盖(45% ~60%)、高覆盖(>60%)5 级[24],统计 1987 年和 2016 年每级所占的面积百分比(表 1)。

表 1　1987—2016 不同 FVC 面积比例

Tab. 1　Proportions of the areas with different FVCs during the period of 1987 - 2016

年份	低覆盖 /%	较低覆盖 /%	中度覆盖 /%	较高覆盖 /%	高覆盖 /%
1987	76.7	19	2.4	1.1	0.8
2016	50	32.3	12	3.5	2.2

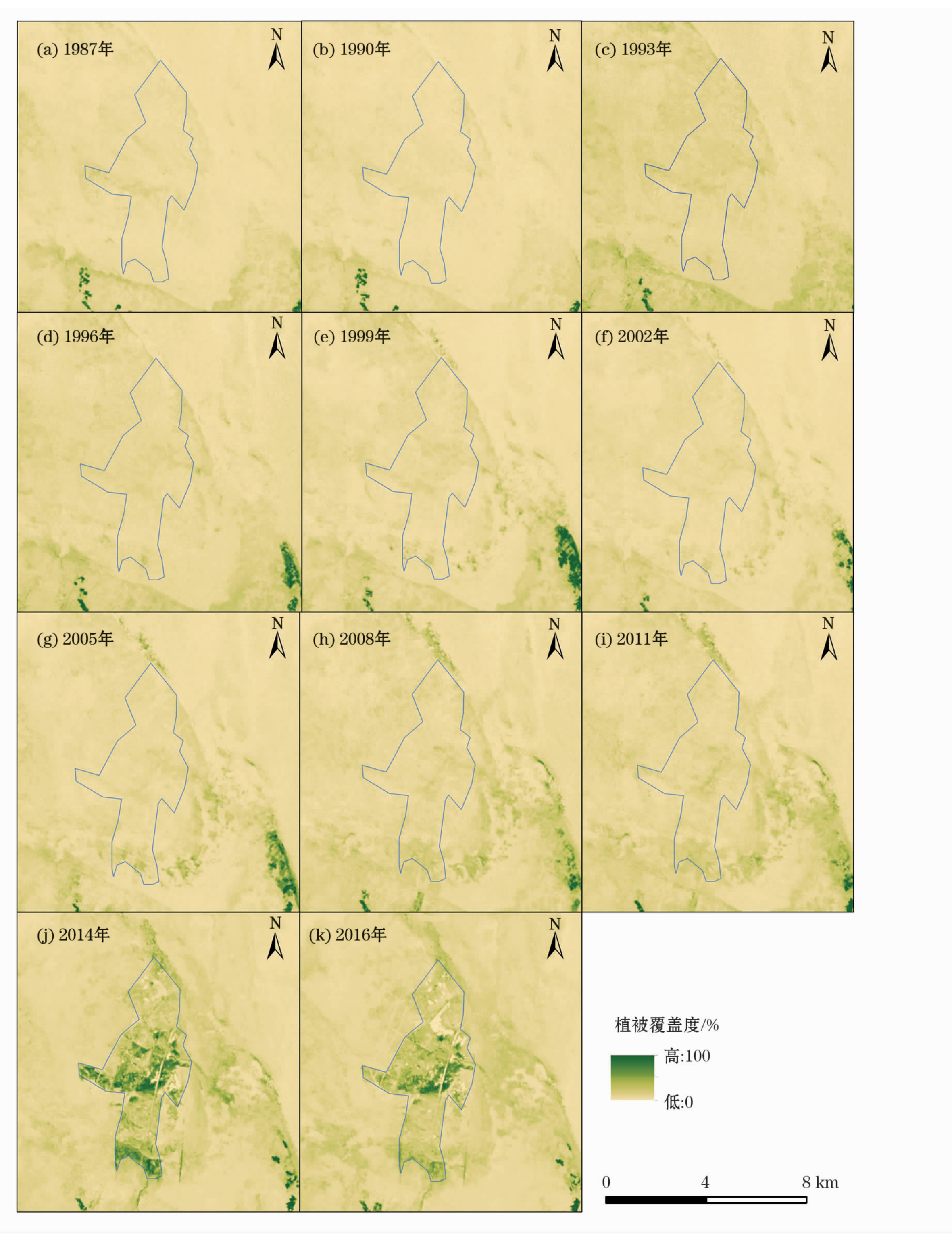


图 3 1987—2016 年 FVC 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of FVC from 1987 to 2016

表 1 表明:低植被覆盖度所占面积比例由 1987 年的 76.7% 降低到 2016 年的 50%,而较低植被覆盖度、中度植被覆盖度、较高植被覆盖度和高植被覆盖度的面积比例都有所上升,上升幅度依次为 13.3%、9.6%、2.4% 和 1.4%。对应的植被覆盖度分级空间变化如图 4 所示。由图 4 可知,1987 年青土湖周边区域植被覆盖度为低覆盖和较低覆盖,至 2016 年植被覆盖度明显上升到中覆盖、较高覆盖和高覆盖,青土湖周边区域植被覆盖度整体增加,且越靠近湖区植被覆盖度越大。

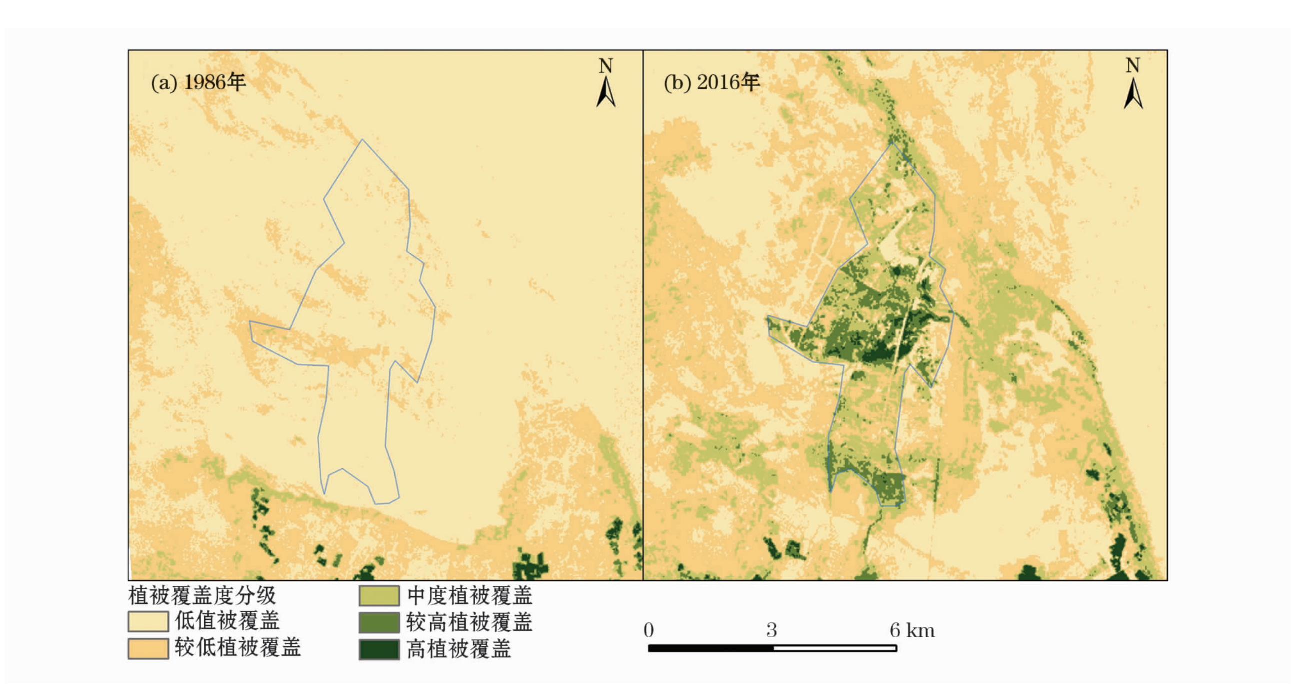


图 4　FVC 等级结构空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of FVC hierarchical structure

2.2　1987—2016 年植被覆盖度的内部变化差异

2.2.1　FVC 变化趋势差异　1987—2016 年植被覆盖度明显增加,但是这种增加过程具有阶段性。对图 2 按照 1987—2010 年和 2010—2016 年两个阶段植被覆盖度的时间变化特征进行对比分析,结果表明:植被覆盖度在 2010 年前后的变化趋势明显不同,1987—2010 年无明显变化趋势,R^2 为 0. 001 2,而 2010—2016 年呈明显上升趋势,R^2 为 0. 775 7。

分别对 1987—2010 年和 2010—2016 年两个阶段的植被覆盖度做空间变化趋势分析及显著性评价,得到空间分布图(图 5 和图 6)。图 5 表明,1987—2010 年,虽然植被覆盖度在不同的区域有上升也有下降,但上升区域面积仅占 2. 8% ,下降区域面积约占 3. 2% ,大致相互抵消,总体上青土湖及其

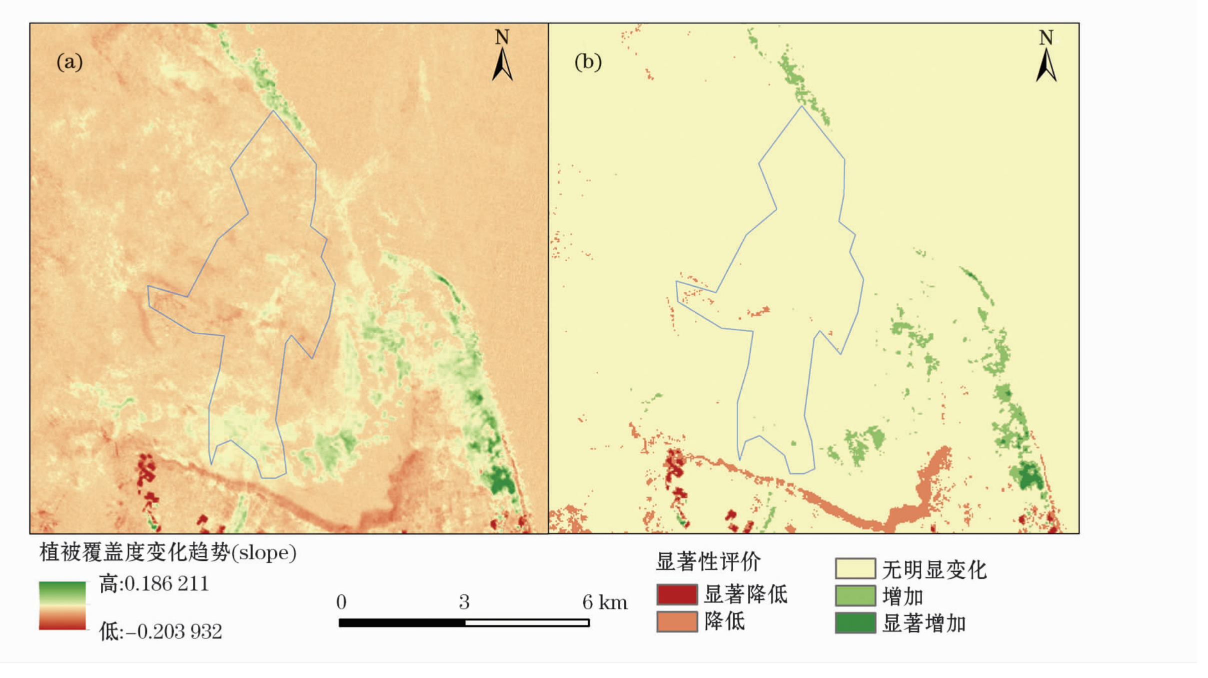


图 5　1987—2010 年空间变化趋势

Fig. 5　Spatial variation trends during the period of 1987 – 2010

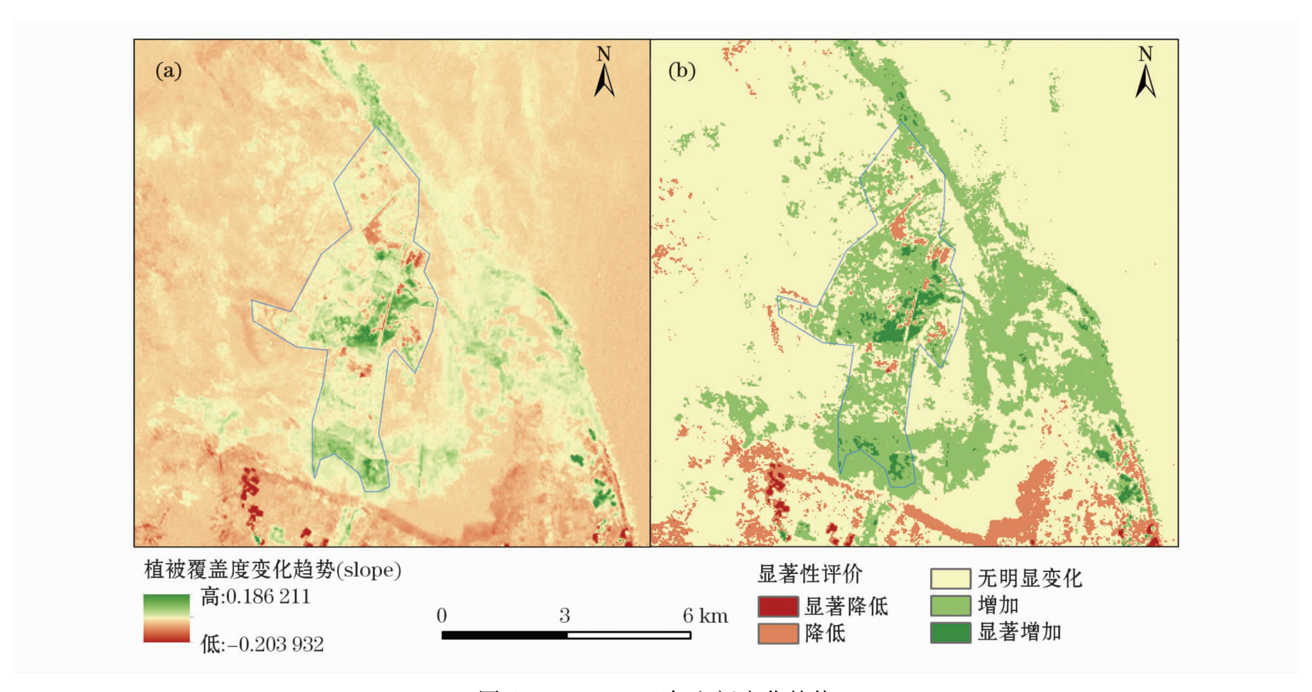


图 6 2010—2016 年空间变化趋势

Fig. 6 Spatial variation trends during the period of 2010 - 2016

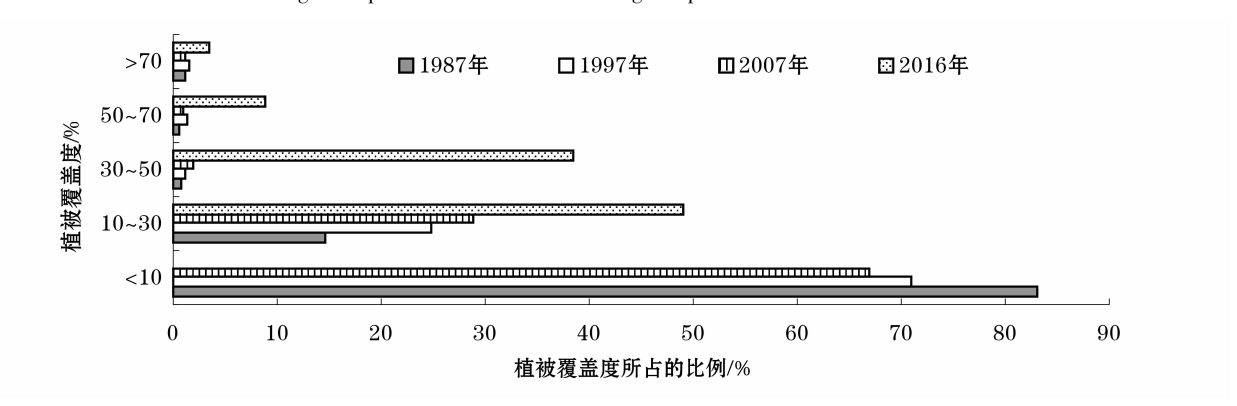


图 7 植被覆盖度比较

Fig. 7 Compared result of vegetation coverage

周边区域植被覆盖度呈无明显变化趋势。图 6a 和图 6b 分别是 2010—2016 年植被覆盖度变化趋势和趋势分级,2010—2016 年,植被覆盖度呈明显上升趋势,上升区域主要围绕在湖区周边,且距离湖区越近植被覆盖度上升越快,湖区中心位置周围植被覆盖度呈显著上升趋势,这与生态输水导致地下水位上升较快有一定的关系,与生态输水对地下水深和植被覆盖度等相关性分析结果一致。其中,不可忽视的是靠近湖区中心也有较小区域的植被覆盖度显著降低,这与输水对植被类型的影响有关[17]。

2.2.2 FVC 的时空统计差异 在时间上,将 1987—2016 年分为 1987、1997、2007、2016 年 4 个时间节点,统计分析不同植被覆盖度区域面积所占比重图 7 可以看出,植被覆盖度小于 10% 的区域面积 1987 年占 83%,1997 年、2007 年和 2016 年分别占 71%、67% 和 0.2%,低覆盖度的区域所占比例显著减少;植被覆盖度在 10% ~30% 变化不明显的区域面积由 14.6% 增加到 49.1%,植被覆盖度在 30% ~50% 的区域面积由 0.8% 增加到 38.5%,植被覆盖度在 50% ~70% 的区域面积由 0.5% 增加到 8.8%,植被覆盖度大于 70% 的区域面积由 1.1% 上升至 3.4%,覆盖度较高的区域所占比例明显增加。故青土湖周边区域植被覆盖度由低覆盖度向中、高覆盖度转变主要在 2010 年 9 月生态输水以后。

在空间上,对青土湖生态输水形成的水面做间距 500 m 的多环缓冲区,对不同距离区域内的植被覆盖度变化趋势统计如图 8。从图 8 可以看出,小于 500 m 范围内植被覆盖度上升的比例最大,其中

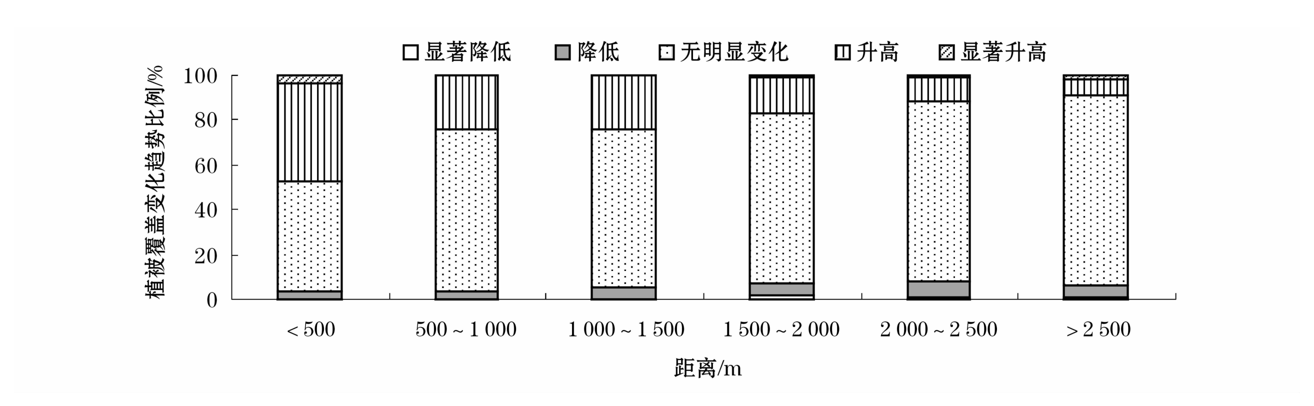


图 8　距水面不同距离的植被覆盖度变化趋势

Fig. 8　Vegetation coverage variation trends in the places with different distances away from the waters

显著上升占 3.7%,上升占 43.9%,下降的占 3.2%,总体呈上升趋势。随着距离的增加上升的比例在减小,无明显变化的比例和降低的比例都有所增加。在小于 2 000 m 区域内虽然有上升的趋势也有下降的趋势,但上升趋势所占比例远大于下降趋势所占的比例,因此总体呈上升趋势。在大于 2 000 m 范围上升趋势与下降趋势的比例相近,可见生态输水对青土湖周边 2 000 m 以内区域植被覆盖度的影响较大。

3　讨 论

3.1　利用 NDVI 反演植被覆盖度的可行性

植被覆盖度是基于植被指数 NDVI 计算的,而 NDVI 被认为是监测植被和生态环境变化的有效指标。NDVI 在计算植被覆盖度时本身有诸多优点,能增强对植被的响应,且利用置信区间取最大 NDVI 与最小 NDVI 的方式反演的 FVC 排除了湖区水体和沙漠高反射率区域对植被覆盖度计算的影响。且本文的研究结果与前人实测数据相关研究结果相似。因此,利用 NDVI 反演植被覆盖度具有一定的代表性,适用于青土湖周边的研究。

3.2　气候因子对植被覆盖度的影响

图 9 为 1987—2016 年 FVC、气温、降水量、蒸发量变化图。对主要的气候因子气温、降水量、蒸发量分别与 FVC 进行相关性分析。根据荒漠植被变化的特点确定检验的显著性水平 α 为 0.1,计算植被覆盖度与降水量的相关系数为 0.57,与气温的相关系数为 -0.34,与蒸发量的相关系数为 -0.38,对应相关系数检验表得降水量与植被覆盖度的不相关概率为 0.01,即相关的概率达 99%,气温与植被覆盖度相关的概率为 90%,蒸发量与植被覆盖度相关的概率为 95%,可以看出相关性都在显著性水平内,说明植被覆盖度与气候因子具有一定的相关性。由相关强度与相关系数关系[21]可知,植被覆盖度与降水量有中等强度正相关性,与气温和蒸发量有弱的负相关性。30 a 来该区域气候变化波动较小,且随着气候的变化植被覆盖变化趋势不明显。总的来说,气候因子对植被覆盖度的影响较弱。

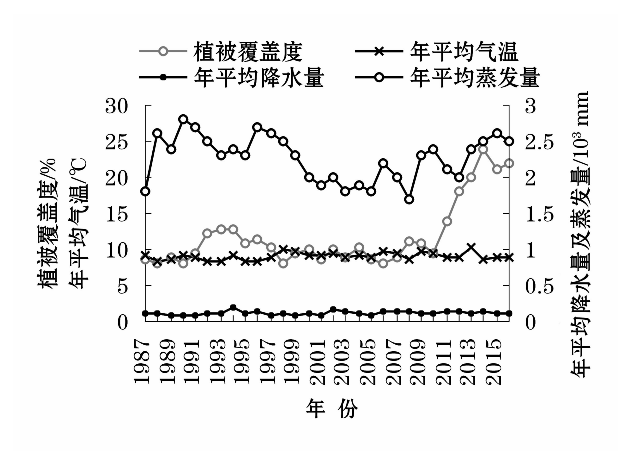


图 9　年平均降水量、气温、植被覆盖度变化

Fig. 9　Variations of annual precipitation, temperature and vegetation coverage

3.3　生态输水对植被覆盖度的影响

3.3.1　相关性分析　青土湖是石羊河流域内典型的生态脆弱区。为改善生态环境,加强青土湖的生态作用,依据《石羊河流域重点治理规划》,从 2010 年 9 月开始,每年以渠道输送的形式向青土湖注入生态用水[19],入湖水量及相关数据如表 2 所示。

自 2010 年生态输水以来,民勤县土地利用类型变化如图 10。统计表明,区内耕地面积从 2010 年的 2 418.91 km^2 减少到 2015 年的 1 931.94 km^2,耕地面积的变化从另一个侧面说明了红崖山水库向青

表 2　2010—2016 年青土湖入湖水量及水量变化

Tab. 2　Changes of water inflow and water volume in Qingtu Lake from 2010 to 2016

年份	入湖水量 /10^4 m^3	形成水面面积 /10^6 m^2	地下水埋深度/m	地下水埋深年变化/m
2008	–	–	3.91	–
2009	–	–	3.84	-0.07
2010	1 290	3.00	3.78	-0.06
2011	2 160	10.00	3.60	-0.18
2012	3 000	15.00	3.54	-0.06
2013	2 000	15.00	3.46	-0.08
2014	3 300	22.00	3.20	-0.26
2015	2 833	22.36	3.14	-0.06
2016	3 358	25.20	2.99	-0.15

注:数据来源于《武威市统计年鉴》。

土湖生态输水主要用于缓解生态问题。

对 2010—2016 年平均植被覆盖度与入湖水量、形成水面面积、地下水埋深做相关性分析,确定置信水平为 0.05。通过相关性检验发现,入湖水量与植被覆盖度同向相关性概率为 95%,植被覆盖度与形成水域面积同向相关性概率达 99%,植被覆盖度与地下水埋深之间异向相关性概率达 99%,入湖水量与地下水埋深之间异向相关性概率达 99.9%,生态输水与植被覆盖度在显著性水平内有很好的相关性。相关系数如表 3。表 3 表明:植被覆盖度与入湖水量成低度正相关;与形成水面面积成低度正相关;由于地下水埋深越大,植被所能吸收到的水分越少,因而与地下水埋深成高度负相关;入湖水量与形成水面面积成高度正相关,与地下水埋深成高度负相关;形成水面面积与地下水埋深成极强负相关。入湖水量对青土湖水域面积形成及附近区域地下水位变化有显著相关性,而水域面积的扩大和地下水位的抬升影响周围的植被覆盖度。可见,植被覆盖度变化对入湖水量和水域面积及附近区域地下水位埋深响应显著。

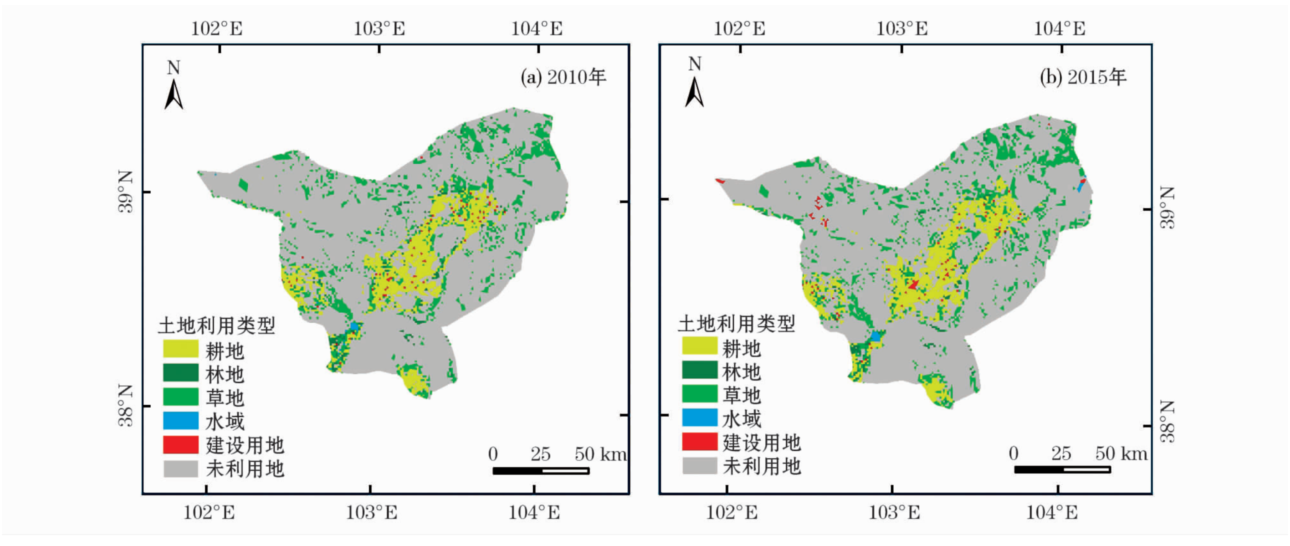


图 10　民勤县土地利用变化

Fig. 10　Land use change in Minqin County

表 3　FVC、入湖水量、形成水域面积、地下水埋深的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficient matrix of FVC, water inflow into the lake, water area and groundwater depth

要素类	植被覆盖度	入湖水量	形成水域面积	地下水埋深
植被覆盖度	1	–	–	–
入湖水量	0.42	1	–	–
形成水域面积	0.50	0.90	1	–
地下水埋深	-0.47	-0.83	-0.97	1

3.3.2　生态输水前后植被覆盖度的变化特征　对 2010 年 9 月生态输水前后植被覆盖度变化趋势的显著性统计表明(图 11),2010 年生态输水前植被覆盖度无明显变化的面积占 94%,覆盖度降低的面积占 3.2%,其中显著降低占 0.5%;覆盖度上升的面积占 2.8%,其中显著上升占 0.6%;但总体趋于稳定状态,变化趋势不明显。2010 年生态输水后,植被覆盖度无明显变化的面积占 77%,覆盖度降低的面积占 6%,其中显著降低的占 0.7%;覆盖度上升的面积占 17%,其中显著上升占 2%;总体呈上升趋势。该统计结果与 1987—2016 年植被覆盖度变化的内部差异分析结果相同。

综上研究表明,30 a 来青土湖周边植被覆盖度有所增加,但在生态输水前变化不明显,主要在生态输水后明显增加。对影响植被覆盖度的两大因素分

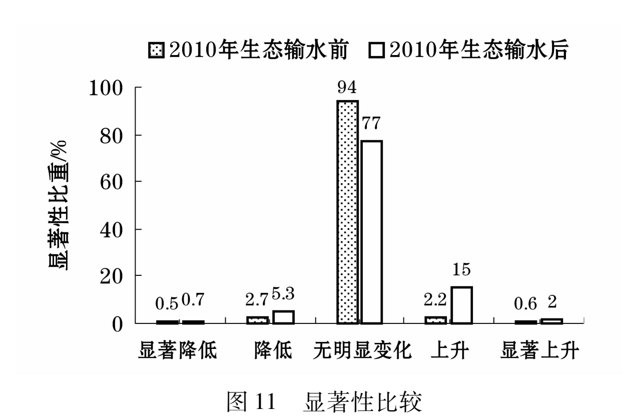


图 11　显著性比较

Fig. 11　Compared result of the significance

别与 FVC 做相关性分析,及其与气温、降水、水汽压、风速、气压等气候因子的多元线性回归分析发现,FVC 与气候因子的相关性较弱,与生态输水形成的水域面积和地下水位抬升有极大的相关性。且 2010 年是植被覆盖度的突变点,2010 年之前的回归值与计算值相近,2010 年之后相差较大,之后几年植被覆盖度逐渐增加,覆盖度明显上升。虽然 2010 年前后气候等自然因素并未发生显著变化,但生态输水始于 2010 年 9 月。由此讨论可得,生态输水是影响青土湖周边区域近年来植被覆盖度明显增加的主要因素,生态输水对青土湖及其周边区域生态环境有很大的改善。

4　结 论

(1) 30 a 来青土湖周边区域植被覆盖度有所上升,上升变化主要受 2010 年以来生态输水的影响,且主要影响 2 000 m 范围内的区域,而气候因子对其影响较弱。

(2) 2010 年生态输水前植被覆盖度总体处于 10% 左右的稳定趋势,2010 年生态输水后呈上升趋势,且越靠近湖区上升趋势越显著,这种变化趋势与湖区中心地下水位上升较快有直接联系。

(3) 植被覆盖度总体呈增加趋势,但生态输水对植被覆盖度变化的影响范围有限,在离湖区较远的区域也有植被覆盖度微弱增加和降低的现象,这些区域主要的影响因素仍为气候因子。

(4) 至 2016 年,青土湖及周边区域植被覆盖度无明显变化的面积仍占 77% ,表明生态输水对该区域生态环境的改善是一个相对缓慢的过程,需要持续较长时间才能达到比较理想的结果。

(5) 青土湖及周边区域影像反射率较高,需要探讨该区域反射率较高的原因是否与生态输水后导致土壤盐碱化等有关;在有数据支持的情况下,应进一步探究不同时期、不同植物的生长情况和需水量,以及离湖区不同的距离内各种植物的生长状况与变化趋势,找出最适宜该区域的植被类型和最合理的输水方式。

参考文献(References):

〔1〕 石万里. 人工输水对石羊河下游青土湖区域生态环境的影响分析〔J〕. 生态学报,2017,37(18):5 951 – 5 960.〔Shi Wanli. Effect of artificial water transfer on ecological environment of Qingtu Lake in the lower reaches of Shiyang River〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2017,37(18):5 951 – 5 960.〕

〔2〕 邓铭江. 塔里木河下游应急输水植被恢复响应及生态修复研究〔J〕. 中国水利,2004(14):15 – 18.〔Deng Mingjiang. Plant recovery responses to the emergency water diversion in the lower reaches of the Tarim River and ecological recovery study〔J〕. China Water Resources,2004(14):15 – 18.〕

〔3〕 石丽,吐尔逊・哈斯木,韩桂红. 塔里木河下游生态输水的背景、效益和存在的问题〔J〕. 水土保持通报,2008,28(1):176 – 180.〔Shi Li,Tuerxun Hasimu,Han Guihong. Background,benefits and problems of water conveyance to the lower reaches of the Tarim River〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2008,28(1):176 – 180.〕

〔4〕 徐海量,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游生态输水后地下水的响应研究〔J〕. 环境科学研究,2003,16(2):19 – 22,38.〔Xu Hailiang,Chen Yaning,Li Weihong. Study on response of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of the Tarim River〔J〕. Research of Environmental Sciences,2003,16(2):19 – 22,38.〕

〔5〕 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复〔J〕. 生态学报,2007,27(2):538 – 545.〔Chen Yaning,Li Weihong,Chen Yapeng,et al. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River,China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2007,27(2):538 – 545.〕

〔6〕 陈永金,陈亚宁,刘加珍. 塔里木河下游植被覆盖度变化与地下水质关系〔J〕. 环境科学,2010,31(3):612 – 617.〔Chen Yongjin,Chen Yaning Liu Jiazhen. Correlationships between the coverage of vegetation and the quality of ground water in the lower reaches of the Tarim River〔J〕. Environmental Science,2010,31(3):612 – 617.〕

〔7〕 沙代提・木沙,玉米提・哈力克,托乎提・艾合买提,等. 塔里木河下游生态输水过程中荒漠河岸林活力恢复监测〔J〕. 生态环境学报,2009,18(5):1 898 – 1 902.〔Shadaiti Musha,Umut Halik,Tuohuti Aihemaiti,et al. Monitoring on vitality dynamics of tugai vegetation in the lower reaches of Tarim River by ecological water delivery〔J〕. Ecology and Environmental Sciences,2009,18(5):1 898 – 1 902.〕

〔8〕 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价〔J〕. 冰川冻土,2007,29(3):380 – 386.〔Deng Mingjiang. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2007,29(3):380 –

386.〕
〔9〕 阮晓,王强,陈亚宁,等.塔里木河流域荒漠河岸植物对应急输水的生理响应〔J〕.生态学报,2005,25(8):1 966－1 973.〔Ruan Xiao,Wang Qiang,Chen Yaning,et al. Physiological response of desert plants to watering in hyper arid areas of Tarim River〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2005,25(8):1 966－1 973.〕
〔10〕 滑永春,李增元,高志海,等.2001年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析〔J〕.干旱区研究,2017,34(2):337－343.〔Hu Yongchun,Li Zengyuan,Gao Zhihai,et al. Variation of vegetation coverage in Minqin County since 2001〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(2):337－343.〕
〔11〕 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系〔J〕.遥感技术与应用,2017,32(5):966－972.〔Zhou Jinlin,Ma Mingguo,Xiao Qing,et al. Vegetation dynamics and its relationship with climatic factors in southwestern China〔J〕. Remote Sensing Technology and Application,2017,32(5):966－972.〕
〔12〕 苏王新,李卓,陈书琴,等.河北坝上地区植被覆盖演化特征及其风险评估〔J〕.干旱区研究,2018,35(3):686－694.〔Su Wangxin,Li Zhuo,Chen Shuqin,et al. Evolution trend of vegetation coverage and its risk assessment in the bashang region in Hebei Province〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):686－694.〕
〔13〕 张勇,杨自辉,王立,等.石羊河中游生长季植被覆盖对气候的响应〔J〕.干旱区研究,2018,35(3):662－668.〔Zhang Yong,Yang Zihui,Wang Li,et al. Response of vegetation coverage to climatic factors in the middle reaches of the Shiyang River in growing season〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):662－668.〕
〔14〕 Yang X,Liu S,Yang T,et al. Spatial-temporal dynamics of desert vegetation and its responses to climatic variations over the last three decades:A case study of Hexi region in Northwest China〔J〕. Journal of Arid Land,2016,8(4):556－568.
〔15〕 Yang X,Liu S,Yang T,et al. Spatial-temporal dynamics of desert vegetation and its responses to climatic variations over the last three decades:A case study of Hexi region in Northwest China〔J〕. Journal of Arid Land,2016,8(4):556－568.
〔16〕 李海亮.基于MODIS数据的石羊河流域植被覆盖时空变化研究〔D〕.兰州:西北师范大学,2009.〔Li Hailiang. Study on the Tempoyal-Spatial Change of Vegetation Cover in Shiyang River Basin Based on MODIS Data〔D〕. Lanzhou:Northwest Normal University,2009.〕
〔17〕 李卫红,杨玉海,覃新闻,等.塔里木河下游断流河道输水的生态变化分析〔J〕.中国水土保持,2009,30(6):10－12.〔Li Weihong,Yang Yuhai,Tan Xinwen,et al. Ecological changes of water conveyance in dried-up river way in the down stream of Tarim River〔J〕. Soil and Water Conservation in China,2009,30(6):10－12.〕
〔18〕 陈政融,刘世增,刘淑娟,等.青土湖水面形成对区域典型植被分布的影响〔J〕.中国农学通报,2015,31(21):177－183.〔Chen Zhengrong,Liu Shizeng,Liu Shujuan,et al. Effect of water body forming on the distribution of typical vegetation in Qingtu Lake〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin,2015,31(21):177－183.〕
〔19〕 陈政融,刘世增,刘淑娟,等.芦苇和白刺空间格局对青土湖生态输水的响应〔J〕.草业科学,2015,32(12):1 960－1 968.〔Chen Zhengrong,Liu Shizeng,Liu Shujuan,et al. Response of form *Phragmites australis* and form *Nitraria tangutorum* after ecological water delivery to Qingtu Lake〔J〕. Pratacultural Science,2015,32(12):1 960－1 968.〕
〔20〕 张永明,候敏慧,何玉琛.石羊河流域行业取耗水总量控制与水资源保障方案研究〔M〕.北京:中国水利水电出版社,2015:1－114.〔Zhang Yongming,Hou Minhui,He Yuchen. Study on Total Water Consumption Control and Water Resources Guarantee Scheme in Shiyang River Basin〔M〕. Beijing:China Water Conservancy and Hydropower Press,2015:1－114.〕
〔21〕 蓝欣,郑娇玉,江帆,等.石羊河流域下游植被覆盖变化与地下水和气候的响应分析〔J〕.兰州大学学报(自然科学版),2015,51(6):865－870,876.〔Lan Xin,Zheng Jiaoyu,Jiang Fan,et al. Astudy on the responses of vegetation cover to dynamic changes in groundwater and climatic factors in the lower reaches of Shiyang River basin〔J〕. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2015,51(6):865－870,876.〕
〔22〕 赵军,韦莉,陈姗.石羊河流域上游生态系统服务价值的变化研究〔J〕.干旱区资源与环境,2010,24(1):36－40.〔Zhao Jun,Weili,Chen Shan. Dynamics of the ecosystem service values a long the upper reaches of Shiyang River basin〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,24(1):36－40.〕
〔23〕 姚正毅,王涛,杨经培,等.阿拉善高原频发沙尘暴因素分析〔J〕.干旱区资源与环境,2008,22(9):54－61.〔Yao Zhengyi,Wang Tao,Yang Jingpei,et al. Analysis on frequently occurrence of dust storm in the Alxa Plateau〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2008,22(9):54－61.〕
〔24〕 颉耀文,汪桂生.黑河流域历史时期水资源利用空间格局重建〔J〕.地理研究,2014,33(10):1 977－1 991.〔Jie Yaowen,Wang Guisheng. Reconstruction of historic spatial pattern for water resources utilization in the Heihe River basin〔J〕. Geographical Research,2014,33(10):1 977－1 991.〕
〔25〕 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护〔J〕.地理科学进展,2001,20(3):227－233.〔Tang Qicheng,Zhang Jiebin. Water resources and eco-environment protection in the arid regions in northwest of China〔J〕. Progress in Geography,2001,20(3):227－233.〕
〔26〕 Tang Z,Shi Y,Nan Z,et al. The economic potential of payments for ecosystem services in water conservation:A case study in the upper reaches of Shiyang River basin,northwest China〔J〕. Environment and Development Economics,2012,17(4):445－460.
〔27〕 Zhao Y,Wei Y,Li S,et al. Downstream ecosystem responses to middle reach regulation of river discharge in the Heihe River Basin,China〔J〕. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(11):4 469－4 481.
〔28〕 席海洋,冯起,司建华.实施分水方案后对黑河下游地下水影响的分析〔J〕.干旱区地理,2007,30(4):487－495.〔Xi Haiyang,Feng Qi,Si Jianhua. Influence of water transport project on groundwater level at lower reaches of the Heihe River〔J〕. Arid Land Geography,2007,30(4):487－495.〕
〔29〕 郭铌,梁芸,王小平.黑河调水对下游生态环境恢复效果的卫星遥感监测分析〔J〕.中国沙漠,2004,24(6):740－744.〔Guo Ni,Liang Yun,Wang Xiaoping. Remote sensing monitoring and analysis on effect of environmental recovery in lower reaches of Heihe River due to re-distributing runoff〔J〕. Journal of Desert Research,2004,24(6):740－744.〕

〔30〕阿布都米吉提·阿布力克木,阿里木江·卡斯木,艾里西尔·库尔班,等.基于多源空间数据的塔里木河下游湖泊变化研究〔J〕.地理研究,2016,35(11):2 071－2 090.〔Ablekim Abdimijit, Kasimu Alimujiang, Kurban Alishir, et al. Evolution of small lakes in lower reaches of Tarim River based on multi-source spatial data〔J〕. Geographical Research,2016,35(11):2 071－2 090.〕

〔31〕张一驰,于静洁,乔茂云,等.黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究〔J〕.水利学报,2011,42(7):757－765.〔Zhang Yichi, Yu Jingjie, Qiao Maoyun, et al. Effects of eco-water transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River Basin〔J〕. Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(7):757－765.〕

〔32〕任娟,肖洪浪,王勇,等.居延海湿地生态系统服务功能及价值评估〔J〕.中国沙漠,2012,32(3):852－856.〔Ren Juan, Xiao Honglang, Wang Yong, et al. Valuation of ecosystem service values of Juyan Lake wetland〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(3):852－856.〕

〔33〕Zhao Y, Wei Y, Li S, et al. Downstream ecosystem responses to middle reach regulation of river discharge in the Heihe River Basin, China〔J〕. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(11):4 469－4 481.

〔34〕Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems〔J〕. Nature, 2003, 421(6 918):37－42.

〔35〕Xiao S, Xiao H, Peng X, et al. Hydroclimate-driven changes in the landscape structure of the terminal lakes and wetlands of the China's Heihe River Basin〔J〕. Environmental monitoring and assessment,2015,187(1):4 091.

〔36〕Wolters M, Garbutt A, Bakker J P. Salt-marsh restoration: Evaluating the success of de-embankments in north-west Europe〔J〕. Biological Conservation,2005,123(2):249－268.

〔37〕Li Y, Wang N A, Zhang C Q, et al. Early holocene environment at a key location of the northwest boundary of the Asian summer monsoon: A synthesis on chronologies of Zhuye Lake, Northwest China〔J〕. Journal of Arid Land,2014,6(5):511－528.

〔38〕Li W, Li Z, Wang J. Evaluation of oasis ecosystem risk by reliability theory in an arid area: A case study in the Shiyang River Basin, China〔J〕. Journal of Environmental Sciences (China), 2007, 19(4):508－512.

〔39〕邓晨晖,白红英,高山,等.秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应〔J〕.自然资源学报,2018,33(3):425－438.〔Deng Chenhui, Bai Hongying, Gao Shan, et al. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities〔J〕. Journal of Natural Resources,2018,33(3):425－438.〕

Effect of Ecological Water Conveyance on Vegetation Coverage in Surrounding Area of the Qingtu Lake

ZHAO Jun[1],　YANG Jian-xia[1],　ZHU Guo-feng[1,2]

(1. *College of Geography and Environmental Science*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *China*;
2. *State key Laboratory of Cryosphere Science*, *Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract:　Ecological water conveyance is an effective way to alleviate ecological problems in the form of human intervention to regenerate the degenerated ecology, and it is applied in the surrounding area of the Qingtu Lake, the tail-end lake of the Shiyang River in Minqin County, Gansu Province. The effect of ecological water conveyance on the ecology and environment in the region has attracted much attention. In this paper, the inversion of vegetation coverage (FVC) was reconstructed using the Landsat images in the surrounding area of the Qingtu Lake during the period from 1987 to 2016. The characteristics of the overall dynamic change of FVC were firstly explored, and then the relationship between such change and the ecological water conveyance was analyzed. The results showed that the average vegetation coverage in the surrounding area of the Qingtu Lake was increased from about 10% to 20% in the past 30 years. The change trend of vegetation coverage before and after 2010 was obviously different. The trend analysis was used to compare the characteristics of vegetation cover before and after the ecological water conveyance in September 2010, and the results showed that the effect of climate change on the vegetation coverage in the study area was slight although climate change was the main factor affecting the large-scale vegetation coverage. The vegetation coverage was mainly increased in the area near the lake, and the ecological water conveyance was the main factor affecting its increase. The change of annual vegetation coverage before the ecological water conveyance in 2010 was not obvious, but after that it was in a significant increase trend.

Key words:　ecological water conveyance; vegetation coverage; climate change; Qingtu Lake